

論文 乾式剥離防止シートの性能評価に関する研究

兼松 学^{*1}・朴 同天^{*2}・野口 貴文^{*3}

要旨：本研究は、劣化した鉄筋コンクリート造建築物からのかぶりコンクリート片の剥落を防止する目的として、コンクリート表面に乾式連続繊維シート(乾式ビニロンシート, 乾式成型板)を貼り付けた場合、シートによる剥落防止効果の確認を剥落メカニズムを考慮した一連の実験(引張試験, 1軸引張せん断試験, 押抜き試験)を通じて行った。その結果、乾式連続シートの中乾式成型板は、ビニロンシートを用いた従来工法である湿式工法比べ、優れた性能を示した。

キーワード：剥落防止乾式連続繊維シート, 引張試験, 1軸引張せん断試験, 押抜き試験

1. はじめに

経年した鉄筋コンクリート造建築物の中にはひび割れによる劣化が進行し、剥離・剥落が生じているものが少なからずある。こうした建築物は使用安全性を低下させ、放置しておけば重大な事故を引き起こす可能性があり危険であることは言うまでもなく、適切な対策が必要不可欠である。

剥離・剥落が生じた鉄筋コンクリート造建築物の補修方法は、現在多くの工法が研究開発や実用化の段にあるが、その中の一つに連続繊維シート等を貼付けることにより、コンクリート塊が剥落するのを防止する工法がある。これらの工法は、そもそも剥落の危険性の高い箇所は緊急性が高く、十分な工期を確保できなかつたり、コストに大きく影響するため工期短縮が望まれている分野である。本研究は、工期短縮と品質の確保を可能とする乾式剥離防止工法に着目し、剥離防止材の力学的性能評価を主眼とした性能評価に関する考察を行うものである。

2. 実験概要および水準と因子

連続繊維シート等を用いて剥離したコンクリート片を支持する場合、連続繊維シート等にはシート自体に発生する引張力の分力により面外にシートを剥離させる力と、面内のせん断力2つが作用する(図-1)¹⁾。このとき、連続繊維シートの破壊形態は、面内のせん断力が卓越し引張りせん断破壊をおこすか、面外への力により剥離破壊するか、シートにかかる引張り力によりシート自体が破断するかの3つの形態によると考えられる。従って、シートを用いた工法

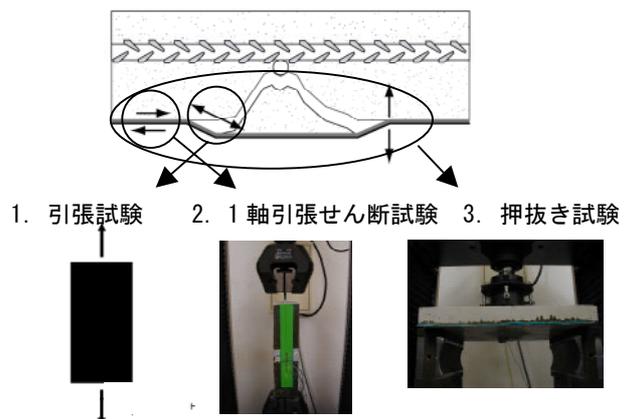


図-1 剥離防止連続繊維シートの剥離させる力

*1 東京大学 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*3 東京大学 工学研究科建築学助教授 工博 (正会員)

の剥落防止性能を評価するためにはこれら 3 つの力学特性の評価が不可欠である。また、従来の押抜き試験による剥落防止工法の性能評価は、この 3 つの破壊形態を同時に評価するものであると考えられる。

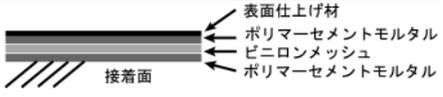
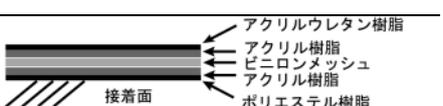
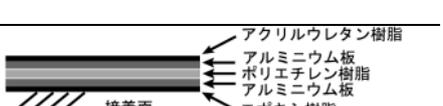
本実験では、これら 3 つの力学特性の把握を目的とし、総合的な剥落防止性能を測定する目的で押抜き試験を、面内のせん断力に対する力学特性を評価する目的で 1 軸引張せん断試験を、また材自体の力学特性を把握する目的で引張り試験をそれぞれ行った。

試験のパラメーターとしては、シートの種類、湿式・乾式の施工方法、コンクリート表面の粗さを水準とし、剥落防止効果の違いを確認した。具体的には、湿式ビニロンシート工法、乾式ビニロンシート工法、乾式成型板（ポリエチレンシートをアルミ板で補強したもの）工法の 3 種類を採用した。表-1 に各工法のシートの構成を示す。乾式工法であるビニロンシート工法および乾式成型板については、エポキシ系の接着剤を用いて接着した。各補修の施工は専門の施工技術者によって行い、施工工程は、湿式ビニロンが下地処理、プライマー塗布、エポキシ系樹脂塗布、シートの貼り付け、ポリマーセメントモルタル施工、仕上げ材施工の計 5 日、乾式ビニロンシートおよび乾式成型板は、下地処理、プライマー塗布、エポキシ系樹脂塗布、シートの貼り付けの計 3 日とした。

また、押抜き試験に関しては、コンクリート板の接着面の粗さを水準とし、表-1 に示す平滑面、ひび割れ面、凹凸面の 3 水準の試験体を用意した。

表-2 は用いたコンクリートの調合である。

表-1 実験水準及び因子

下地 コンクリートの 目粗し方法	平滑面	
	ひび割れ面	
	凹凸面	
接着剤	エポキシ系接着剤	
施工	補修業者によって行う。	
シートの種類	湿式 ビニロン	 <ul style="list-style-type: none"> 表面仕上げ材 ポリマーセメントモルタル ビニロンメッシュ ポリマーセメントモルタル
	乾式 ビニロン	 <ul style="list-style-type: none"> アクリルウレタン樹脂 アクリル樹脂 ビニロンメッシュ アクリル樹脂 ポリエステル樹脂
	乾式 成型板	 <ul style="list-style-type: none"> アクリルウレタン樹脂 アルミニウム板 ポリエチレン樹脂 アルミニウム板 エポキシ樹脂

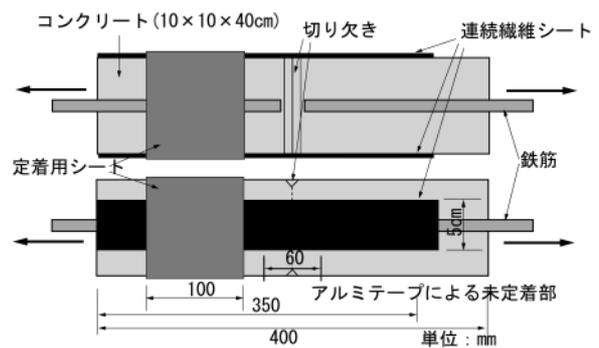


図-2 1 軸引張せん断試験

表-2 コンクリートの調合

セメントの種類	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	W/C (%)	細骨材率 (%)	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	高性能 AE 減水剤 (g/m ³)	圧縮強度 (MPa)
早強	185	370	50	44	951	733	833	69.4

3. 試験方法

3.1 引張試験

まず、ヤング率および引張強度を測定する目的でシートの引張試験を実施した。試験片は乾式成型版およびビニロンシートに関しては、図-2に示すシート全て(接着面を除く)を用い、湿式ビニロンシート工法に関しては、ビニロンメッシュのみをエポキシ接着剤でシート状に成型して試験を行った。

3.2 1軸引張せん断試験²⁾

1軸引張りに対するせん断破壊特性を把握する目的で、1軸引張りせん断試験を行った。試験体として、相対する2面にシートを貼り付けたコンクリート供試体の中央付近を、繊維が接着した状態でハンマーで叩き、破断面を導入したものを作成した。試験体へ引張力を作用させて変位を与え、強制的に繊維シートをせん断方向に剥離させる載荷実験である。1軸引張りせん断試験の概要を図-2に示す。面内の各地点での変形分布を把握するために、破断面を原点としてひずみゲージを15mm間隔に配置した。シートの応力不均一性を防ぐことを目的とし、中央部前後30mmにアルミテープを巻き、シートがコンクリートに定着しないようにした。

3.3 押抜き試験³⁾

試験体は裏面に連続繊維シートを貼り付けたコンクリート平板の中央に円形の孔を開けたものを用いた。試験は試験体中央部の穴にコンク

リート圧子(直径50mm)を入れ、圧子に強制変位を与え、強制的に繊維シートを剥離させる載荷実験である。押抜き試験の概要は図-3に示す通りである。

図-4は押抜き試験の圧子の鉛直変位と時間の関係を示した図である。載荷は変位で制御を行い、1mm/minの速度として載荷を行い、荷重を測定した。剥離長さを測定するため、1ステップの押し込み量を2mmとして圧子に変位を与え、1分間で剥離範囲をたたき試験によって確認し、その状況を連続繊維シート上にマーキングする作業を繰り返し行った。

4. 実験結果

4.1 引張試験

試験の結果得られた荷重変位曲線の一例を図-5に示す。湿式ビニロンシート及び乾式成型板の荷重変位曲線から、初期段階では、繊維シート以外の成型材料の力学的特性が支配的な挙動を示し、成型材料が破断するとシートの特徴が支配的になる複合材としての振舞いが観察された。同じビニロンを用いてもその変形特性が大きく異なる事が観察された。これらをもとに、3種類のシートのヤング率を求めた結果、乾式成型板が最も大きくなり、高い引張強度があることが分かった。表-3は、シートの膜圧をもとに算定した引張試験による乾式剥離防止シートの物性値である。

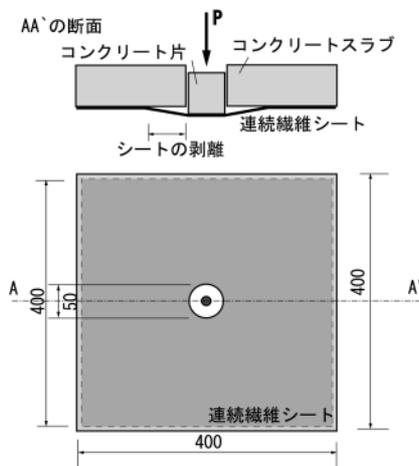


図-3 押抜き試験

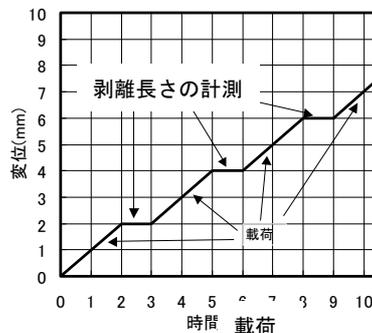


図-4 載荷パターン

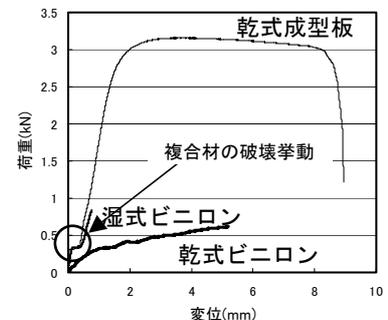


図-5 乾式剥離防止シートの引張試験結果例(荷重変位曲線)

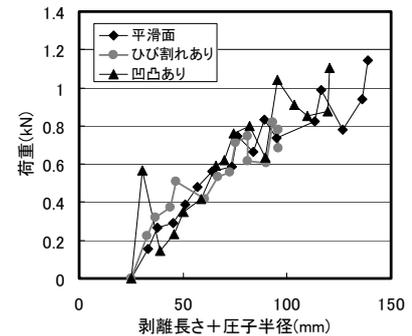
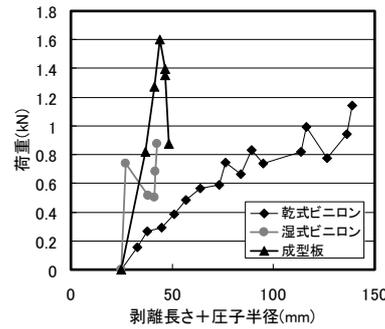
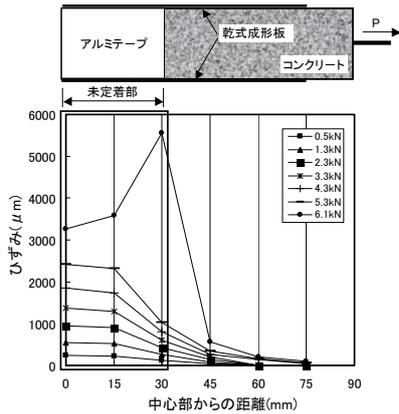


図-6 乾式成型板の中心部からの距離とひずみの関係

図-7 平滑面のコンクリートに対するシートの違いによる差

図-8 乾式ビニロンシートの荷重-剥離長さ

4.2 1軸引張せん断試験

乾式ビニロンシート及び湿式ビニロンシートは、試験体にハンマーで初期ひび割れ入れた段階でシートが破断してしまい、測定に至らなかった。図-6に乾式成型板の荷重と各計測点のひずみとの関係を示す。定着部と未定着部の境目である30mm付近で破断が起きて、その下のせん断荷重のかかる範囲が短く、さらにその範囲でシートの剥離が見られないため、シートがせん断による剥離を生じる前に破断していることが分かる。ここから、今回の試験体ではせん断力によるシートの剥離が生じる前に引張破断が生じていることが確認された。乾式、湿式ビニロンは試験体を設置する際に、シートが破断した。これらも同様に、引張力をせん断力として逸散する前に引張破断が起きた現象であると考えられる。

4.3 押抜き試験

図-7に湿式ビニロン・乾式ビニロン・乾式成型板の平滑面試験体の圧子荷重と剥離長さの関係を示す。最大荷重を比較すると乾式成型板、乾式ビニロン、湿式ビニロンの順となった。しかし、同一荷重に対しての剥離長さを比較すると乾式ビニロンの剥離長さが非常に長く、湿式ビニロンはモルタルにより拘束されるため剥離が短くなり、次いで乾式成型板は板の面剛性による拘束があるために短くなっている。これに

表-3 乾式剥離防止シートの物性値

シートの種類	最大変位 (mm)	最大荷重 (kN)	引張弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
湿式ビニロンシート	0.75	0.83	1.16	12
乾式ビニロンシート	5.20	0.62	0.40	19
乾式成型板	3.16	3.40	1.19	60

対して乾式ビニロンはこうした拘束物が存在しないため、剥離が進展しやすくなると考えられる。これは同一荷重のものが剥離した際に、乾式ビニロンのシート定着長さが他の二つに比べて長いことを意味する。

表面粗さの影響は図-8のように、ほとんど見られなかった。そのため、コンクリート試験体面が平滑な場合の結果のみを示しておく。全体の破壊挙動としては、平滑面の乾式ビニロンシートがシート以外はすべてシートの破断という破壊形状になった。

解析モデルは既往の研究³⁾を、本研究の条件にあうように改変を加えたもので、本研究で用いた乾式剥離防止シートは3層積層ビニロンメッシュ及び乾式成型板であるので、シートの剥離が進展した場合の剥離パターンを図のような円形と仮定したものである。図-9にモデルの概要を示す。

圧子に負荷した荷重 P と連続繊維シートの張力 T の鉛直方向の力の釣り合いから解析モデルを作成し、圧子の鉛直変位 u と剥離長さ a と r_0 の関係から P の解析値を求める。

ここで、 a : 剥離長さ、 r_0 : 圧子の半径、 L : シートの貼り付け長さ、 α : 繊維方向の剥離角度である。

x 軸より θ の角度を有している連続繊維シートに発生する応力のうち原点に向かう分力を σ とする。 σ の x 方向成分 σ_x の合力の鉛直方向 (z 軸方向) における力の釣り合いを考えることにより下式を得る。

$$P_x = 4 \int_0^{r_0+a} \sigma \cdot t \cdot \cos\theta \cdot \sin\alpha \cdot dy \quad (1)$$

$$P_x = 4(r_0+a) \int_0^{r_0+a} \sigma \cdot t \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot \sin\alpha \cdot d\theta \quad (2)$$

$$= 2(r_0+a) \sigma \cdot t \cdot \sin\alpha$$

$$\text{同様に、} P_y = 2(r_0+a) \sigma \cdot t \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

によって円形モデル全体での力の釣り合いを考えると圧子による荷重 P は以下のとおり表される。

$$P = P_x + P_y$$

$$= 4(r_0+a) \cdot t \cdot \sigma \cdot \sin\alpha \quad (4)$$

$$= 4(r_0+a) \cdot t \cdot E \cdot \beta \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} \right)$$

ここで、 E : 連続繊維シートのヤング率

$$\beta = \tan\alpha = \frac{u}{a}$$

t : 連続繊維シートの厚さ

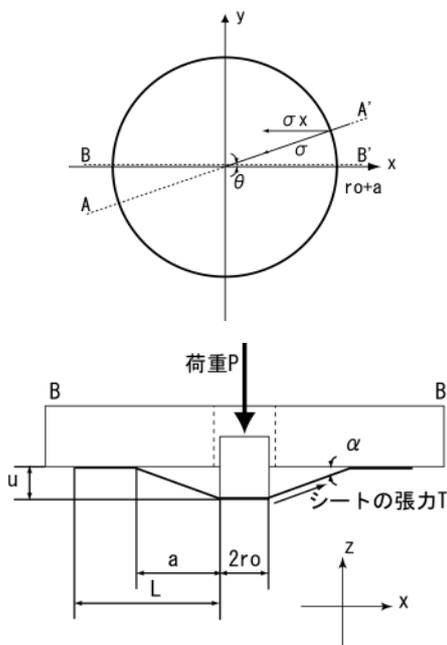


図-9 多層積層の座標設定

乾式成型板の場合、実測値と解析値は荷重が 1.4kN 付近までは非常に良い相関を示したが、これを超えると大きく乖離した。この付近でシートが塑性変形をしたためと考えられる。乾式ビニロンにおいては実測値と解析値が良い相関を示した。実測値荷重が、剥離進展と共に下がるのは、シートの塑性変形が徐々に進行しながら剥離が進展するためと考えられる。湿式ビニロンの場合、解析値と実測値の間に大きな差が出

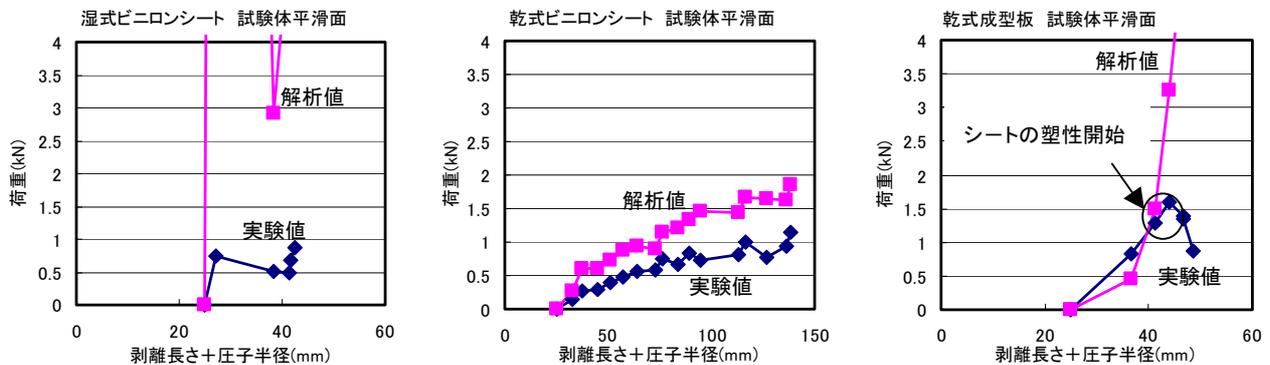


図 - 10 押抜き試験および解析の結果

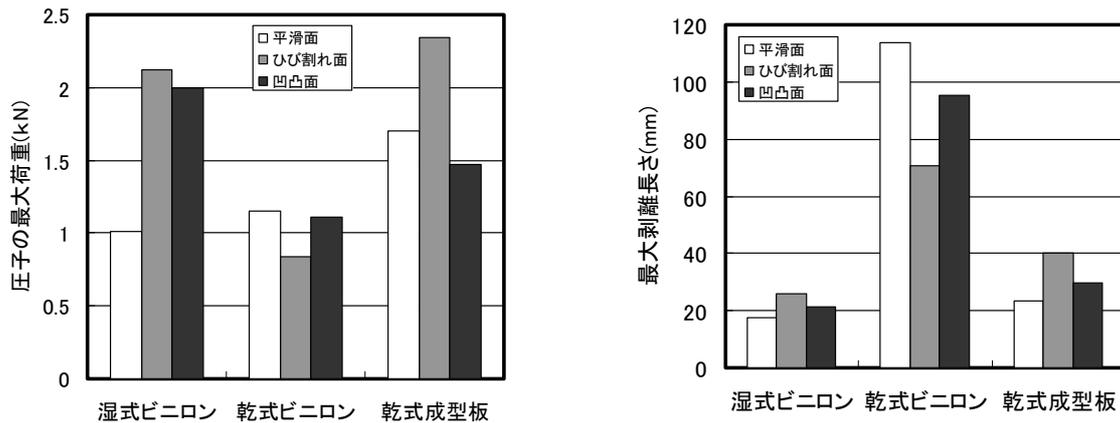


図-11 押抜き試験結果(圧子の最大荷重, 最大剥離長さ)

た。これは剥離現象が離散的に進行する過程で、接着剤あるいは仕上げモルタルの破断面で、ビニロンの変形が部分的に進行するためと考えられる。

図-11 は押抜き試験終了の時、圧子の最大荷重とシートの最大剥離長さをシートごとに比較した図である。乾式成型板の性能は従来の湿式工法と比べ遜色ない性能が認められた。押抜き試験のコンクリート圧子の直径で剥離が生じたと仮定し、コンクリートの比重を 2.4 として試験結果を考察すると、平滑面を用いた試験体では、最大荷重が湿式ビニロンで 1.0kN、乾式ビニロンで 1.1kN、成型板で 1.7kN であるから、それぞれおよそ 2000cm, 2200cm, 3400cm のかぶり厚に相当する。実際のコンクリートの剥離がこのような値になることはまず考えられないため、今回試験を行った範囲では連続繊維シートはどれもコンクリートの剥落防止だけを目的に貼り付けるならば十分な性能を有すると言える。

5. 結論

一連の実験的研究により、以下の知見を得た。

- (1) 湿式ビニロンは引張破断による破壊形状を示した。本実験の範囲では乾式成型板工法の引張り強度が高く、従来の湿式ビニロン工法と遜色ない性能を示した。
- (2) 1 軸せん断試験では、せん断による付着破壊長さは非常に短く、既往の研究²⁾で報告されてい

るような、せん断破壊は見られず、引張によるシートの破断が生じた。

- (3) コンクリートの表面粗さの影響は見られなかった。
- (4) 面剛性のある成型板に関しては引張破壊によるシートの破断の前に、曲げ破壊が先行している可能性もあり、今後さらに調査・検討する必要がある。

今後は過酷環境下を模擬し促進劣化させ、剥落防止シートの力学的性能の変化に関して研究を進める予定である。

本研究で用いたシステム及び材料は DSK (大日本色材工業株式会社, 大出努氏) に提供いただいた。ここに記して謝辞を表わす。

参考文献

- 1) 藤井太一, 座古勝 共著: 複合材料の破壊と力学, 実務出版株式会社
- 2) 西田浩之ほか: 連続繊維シートとコンクリートとの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1507-1512, 1999
- 3) 呉智深ほか: 連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究, 土木学会論文集, Vol.49, No.662, pp.45-58, 2000.11